

*Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra materiálového inženýrství*

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Zadání bakalářské práce

Student:

Martin Duda

Studijní program:

B3923 Materiálové inženýrství

Studijní obor:

3911R030 Technické materiály

Téma:

Studie vlivu použitých materiálů a tvaru izostaticky lisované keramiky pro kontinuální odlévání oceli.

Study of effect used materials and shape isostatically-pressed ceramic to continous casting

Zásady pro vypracování:

Úvod

Stručný popis izostaticky lisované keramiky

Základní charakteristika použití izostaticky lisované keramiky pro kontinuální odlévání oceli

Studie návrhů principu výroby keramiky k dosažení žádaných vlastností

Studie mechanismu proudění v kontinuálním odlévání za použití různých typů výrobků

Shrnutí problematiky kontinuálního odlévání s diskuzí možností dalšího rozvoje v této oblasti

Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

1) Irving, W.R.: Continuous Casting of Steel, (London, UK: Inst. of Materials, 1 Carlton House Terrace, 1993), 1-206.

Jonšta, Z.: Vlastnosti technické keramiky a metody jejich hodnocení, Kovosil Ostrava, 1998.

Thomas, B.C.: Mathematical Models of Continuous Casting of Steel Slabs (Annual Report, Continuous Casting Consortium, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999).

4) Schrewe, H.F.: Continuous Casting of Steel, Fundamental Principles and Practice, (Stahl und Eisen, Düsseldorf, Germany, 1991), 194.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Zdeněk Jonšta, CSc.**

Datum zadání:

30.11.2011

Datum odevzdání:

18.05.2012

prof. Ing. Vlastimil Vodárek, CSc.
vedoucí katedry



prof. Ing. Ludovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty

Zásady pro vypracování bakalářské práce

I.

Bakalářskou prací (dále jen BP) se ověřují vědomosti a dovednosti, které student získal během studia, a jeho schopnosti využívat je při řešení teoretických i praktických problémů.

II.

Uspořádání bakalářské práce:

- | | |
|--|------------------------------|
| 1. Titulní list | 5. Obsah BP |
| 2. Zásady pro vypracování BP | 6. Textová část BP |
| 3. Prohlášení + místopřísežné prohlášení | 7. Seznam použité literatury |
| 4. Abstrakt + klíčová slova česky a anglicky | 8. Přílohy |

ad 1) Titulním listem je originál zadání BP, který student obdrží na své oborové katedře.

ad 2) Tyto „Zásady pro vypracování bakalářské práce“ následují za titulním listem.

ad 3) Prohlášení + místopřísežné prohlášení napsané na zvláštním listě (student jej obdrží na své oborové katedře) a vlastnoručně podepsané studentem s uvedením data odevzdání BP. V případě, že BP vychází ze spolupráce s jinými právníckými a fyzickými osobami a obsahuje citlivé údaje, je na zvláštním listě vloženo prohlášení spolupracující právnícké nebo fyzické osoby o souhlasu se zveřejněním BP.

ad 4) Abstrakt a klíčová slova jsou uvedena na zvláštním listě česky a anglicky v rozsahu max. 1 strany pro obě jazykové verze.

ad 5) Obsah BP se uvádí na zvláštním listě. Zahrnuje názvy všech očíslovaných kapitol, podkapitol a statí textové části BP, odkaz na seznam příloh a seznam použité literatury s uvedením příslušné stránky. Předpokládá se desetinné číslování.

ad 6) Textová část BP obvykle zahrnuje:

- Úvod, obsahující charakteristiku řešeného problému a cíle jeho řešení v souladu se zadáním BP;
- Vlastní rozpracování BP (včetně obrázků, tabulek, výpočtů) s dílčími závěry, vhodně členěné do kapitol a podkapitol podle povahy problému;
- Závěr, obsahující celkové hodnocení výsledků BP z hlediska stanoveného zadání.

BP nemusí obsahovat experimentální (aplikační) část.

BP bude zpracována v rozsahu min. 25 stran (včetně obsahu a seznamu použité literatury).

Text musí být napsán vhodným textovým editorem počítače po jedné straně bílého nelesklého papíru formátu A4 při respektování následující doporučené úpravy - písmo Times New Roman (nebo podobné) 12b; řádkování 1,5; okraje – horní, dolní – 2,5 cm, levý – 3 cm, pravý 2 cm. Fotografie, schémata, obrázky, tabulky musí být očíslovány a musí na ně být v textu poukázáno. Budou zařazeny průběžně v textu, pouze je-li to nezbytně nutné,

jako přílohy (viz ad 8).

Odborná terminologie práce musí odpovídat platným normám. Všechny výpočty musí být přehledně uspořádány tak, aby každý odborník byl schopen přezkoušet jejich správnost. U vzorců, údajů a hodnot převzatých z odborné literatury nebo z praxe musí být uveden jejich pramen - u literatury citován číselným odkazem (v hranatých závorkách) na seznam použité literatury.

Nedostatky ve způsobu vyjadřování, nedostatky gramatické, neopravené chyby v textu mohou snížit klasifikaci práce.

ad 7) BP bude obsahovat alespoň 10 literárních odkazů, z toho nejméně 3 v některém ze světových jazyků.

Seznam použité literatury se píše na zvláštním listě. Citaci literatury je nutno uvádět důsledně v souladu s ČSN ISO 690. Na práce uvedené v seznamu použité literatury musí být uveden odkaz v textu BP.

ad 8) Přílohy budou obsahovat jen ty části (speciální výpočty, zdrojové texty programů aj.), které nelze vhodně včlenit do vlastní textové části, např. z důvodu ztráty srozumitelnosti

III.

Bakalářskou práci student odevzdá ve dvou knihařsky svázaných vyhotoveních, pokud katedra garantující studijní obor neurčí jiný počet. Vnější desky budou označeny takto: nahoře:

*Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava
Fakulta metalurgie a materiálového inženýrství
Katedra*

uprostřed:

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

dole:

Rok

Jméno a příjmení

Kromě těchto dvou knihařsky svázaných výtisků odevzdá student kompletní práci také v elektronické formě do IS EDISON. Práce vložená v elektronické formě do IS EDISON se musí zcela shodovat s prací odevzdanou v tištěné formě.

IV.

Bakalářská práce, která neodpovídá těmto zásadám, nemůže být přijata k obhajobě. Tyto zásady jsou závazné pro studenty všech studijních programů a forem bakalářského studia fakulty metalurgie a materiálového inženýrství Vysoké školy báňské – Technické univerzity Ostrava od akademického roku 2011/2012.

Ostrava 30. 11. 2011

Prof. Ing. Eudovít Dobrovský, CSc., Dr.h.c.
děkan fakulty metalurgie a materiálového inženýrství
VŠB-TU Ostrava

PROHLÁŠENÍ

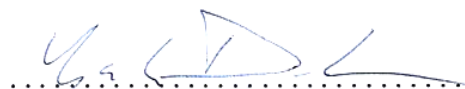
Prohlašuji, že

- jsem byl(a) seznámen(a) s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. - autorský zákon, zejména §35 - užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního (§60 - školní dílo);
- беру на vědomí, že Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB - TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§35 odst. 3);
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude archivována v elektronické formě v databázi Ústřední knihovny VŠB - TUO a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO;
- bylo sjednáno, že s VŠB - TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu §12 odst. 4 autorského zákona;
- bylo sjednáno, že užít své dílo - bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB - TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB - TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- беру на vědomí, že odevzdáním své bakalářské práce souhlasím s jejím zveřejněním podle zákona č. 111/1998Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (Zákon o vysokých školách) bez ohledu na výsledek její obhajoby.

Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval(a) samostatně.

V Ostravě

19.8.2012



podpis (jméno a příjmení studenta)

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval prof. Ing. Zdeňku Jonštovi, CSc. za ochotu, cenné připomínky a odborné rady, kterými přispěl k vypracování této bakalářské práce.

Abstrakt

Bakalářská práce je zaměřena na speciální keramiku používanou pro plynulé odlévání oceli. Tato keramika je důležitým článkem v provozech plynulého odlévání oceli a díky neustálému vývoji technologií za účelem zvýšení kvality, úspory materiálů, energií a zvýšení efektivnosti jsou na ni kladeny nejvyšší možné požadavky.

V práci jsem se zabýval problematikou plynulého odlévání, uplatnění speciální keramiky v procesu výroby oceli, nástínem řešení konstrukce a tvaru k dosažení lepší kvality a efektivit na základě literárních odkazů. Samotný proces výroby speciální keramiky je popsán dle vlastních zkušeností.

Klíčová slova: plynulé odlévání; ponorná výlevka; Al_2O_3 ; keramika

Abstract

This bachelor work is bent on special ceramics used for continuous casting. This ceramics is important article in continuous casting plant and thanks to continuous development technology with the purpose of increasing qualities, saving materials, energy and increasing effectiveness are lay highest maximum requirements.

I occupied about problems of continuous casting in my work, application of the special ceramics in the process of steel production, outline solving construction to achievement better qualities and effectiveness in accordance literary legacies. Production process is according personal experience.

Key words: continuous casting; submerged entry nozzle; Al_2O_3 ; ceramics

OBSAH

1. ÚVOD	8
2. TEORETICKÁ ČÁST	9
2.1. Keramika	9
2.1.1. Technická keramika	9
2.1.1.1. Vlastnosti technické keramiky	9
2.1.2. Izostaticky lisovaná keramika	11
2.2. Základní charakteristika použití izostaticky lisované keramiky	12
2.2.1. Plynulé odlévání oceli	12
2.2.1.1. Součástí plynulého odlévání	14
2.2.2. Použití izostaticky lisované keramiky	16
2.2.2.1. Zátková tyč	17
2.2.2.2. Mezipánvová výlevka	18
2.2.2.3. Ponorná výlevka	19
2.3. Výroba izostaticky lisované keramiky	19
2.3.1. Materiál	19
2.3.2. Testování	19
2.3.3. Lisování	20
2.3.4. Slinování	20
2.3.5. Finální fáze	21
2.3.6. Shrnutí	21
2.4. Vlivy tvaru na mechanismy proudění u ponorných výlevek	21
2.4.1. Modelování proudění	21
2.4.2. Náporová výlevka	23
2.4.3. Beznáporová výlevka	23
2.4.4. Studium vlivu konstrukce ponorných výlevek	24
2.5. Problematika používání keramiky pro plynulé odlévání	27
3. ZÁVĚR	30
4. LITERATURA	31

1. ÚVOD

Bakalářská práce se zabývá výrobou, použitím a uplatněním speciální žáruvzdorné keramiky pro plynulé odlévání oceli. Proces plynulého odlévání, jehož je speciální keramika nedílnou součástí, je od 50. let 20. století na výrazném vzestupu. Do té doby se odlévání provádělo do stacionárních kokil a produktem byly ingoty různých tvarů příčného průřezu. S nástupem plynulého odlévání, které přineslo zvýšení produktivity, kvality a celkové efektivnosti, se zvedly i podíly plynulého odlévání na produkci oceli v celosvětovém měřítku.

V současné době je celosvětově podíl plynulého odlévání téměř na 95% z celkové produkce výroby. Stalo se tak hlavní technologií výroby oceli. V široké konkurenci je proto nutné zavádět stále dokonalejší řízení procesu odlévání s cílem zvýšit jakost oceli a současně snížit náklady na provoz. Stejně jako v jiných oblastech, tak i zde se široce uplatňuje matematické modelování pomocí stále výkonnější výpočetní techniky.

Na speciální žáruvzdornou keramiku, která výrazně ovlivňuje proces odlévání, jsou kladeny stále větší nároky na kvalitu, trvanlivost a funkční zdokonalení. Speciální keramika také prochází neustálým vývojem a zdokonalováním za použití nejmodernější techniky a napomáhá tak výrazně ke zdokonalení řízení procesu a optimalizaci odlévání jako celku.

2. TEORETICKÁ ČÁST

2.1. Keramika

Keramika zahrnuje velké množství materiálů, které se vzájemně liší svou strukturou, chemickým složením a vlastnostmi. Jedná se převážně o krystalický materiál, který je tvořen především anorganickými sloučeninami nekovového charakteru. Keramiku lze všeobecně rozdělit na přírodní a technickou keramiku [1].

2.1.1. Technická keramika

Technická keramika, kde patří i keramika používaná k odlévání oceli je vyráběna především za syntetických surovin a má využití při aplikacích za extrémních podmínek. K jejím hlavním vlastnostem patří žáruvzdornost, vysoká chemická odolnost, vysoká pevnost v tlaku a odolnost proti opotřebení. Technickou keramiku lze rozdělit do třech skupin: keramika oxidická, keramika neoxidická a keramika směsná.

Pro použití v procesu plynulého odlévání oceli se používá převážně keramika oxidická, která je tvořena oxidem, ve formě syntetického prášku. Používají se oxidy na bázi Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO a SiO_2 jako hlavní složky s přidavkem dalších oxidů v malém množství jako oxidy Na_2O , B_2O_3 , CaO , HfO_2 a další, k vytvoření určitého typu směsi, která pak procesem lisování a slinování dá vzniknout výslednému typu keramiky, která má vysokou tvrdost, pevnost a odolnost vůči korozi.

2.1.1.1. Vlastnosti technické keramiky

Keramické materiály vynikají vysokou pevností, tvrdostí a ošetrivostí, ale současně jsou náchylné ke křehkému porušení. Keramika vykazuje relativně velkou pórovitost a její teplotní vodivost a roztažnost je podobná kovům. Keramika má vysokou tlakovou pevnost a je charakteristická vysokým bodem tání, chemickou odolností, žáruvzdorností a svými elektrickými vlastnostmi [2].

Mechanické vlastnosti

V procesu slinování keramických materiálů ve struktuře vznikají zpravidla tři fáze: krystalická, amorfni (sklovitá) a plynná. Krystalická fáze určuje především fyzikální vlastnosti, amorfni má vliv na technologii tváření a teplotu výpalu. Plynná fáze určuje hlavně pórovi-

tost materiálu, která ovlivňuje mechanické vlastnosti [1]. Mezi mechanické vlastnosti patří: *Pevnost* – je odolnost vůči napětí, v keramice při zátěži dochází k pružné deformaci až do okamžiku porušení náhlým lomem, které je vyvoláno účinkem tahových napětí. Pevnost v tlaku je několikanásobně vyšší než pevnost v tahu. Velký vliv na pevnost keramiky má množství pórů a velikost zrna, čím více je obsaženo v keramice pórů a čím jsou zrna větší, tím menší pevnost.

Odolnost proti teplotním rázům – většina keramiky je citlivá k napětím vznikajících při změnách teploty z důvodů nízké pevnosti v tahu a křehkosti. Odolnost keramiky vůči tepelnému pnutí je vyšší, čím je vyšší pevnost a čím je nižší hodnota tepelné roztažnosti a Youngův modul pružnosti [3].

Modul pružnosti – u keramiky je vyšší než u kovů, a přítomost dutin a pórů tento modul u keramických materiálů výrazně snižuje.

Tvrdost – je odpor proti vnikání cizího tělesa a zjišťujeme ji pomocí mechanických zkoušek např. zkouška tvrdosti podle Vickerse, Knoop nebo podle Rockwella.

Lomová houževnatost – patří mezi nejvýznamnější materiálové vlastnosti keramiky a udává lomové chování keramických materiálů. U keramiky dosahuje velmi nízkých hodnot a ukazuje vysokou citlivost keramiky na lokalizované špičky napětí. Lomová houževnatost udává odpor proti šíření trhlin. Keramika nemá dostatečnou ochranu proti šíření trhlin a proto při dosažení určité koncentrace napětí se trhlina rychle šíří procesem štěpení.

Fyzikální vlastnosti

Pórovitost – významná charakteristika keramických materiálů udávána v procentech. Určuje se dle vztahu:

$$p = \frac{\rho - \rho_v}{\rho} \cdot 100 [\%] \quad (1)$$

kde ρ je teoretická hustota určená na základě mřížkových parametrů a atomových hmotností, a ρ_v je objemová hmotnost – hmotnost jednotkového objemu obsahujícího póry.

U technické keramiky se požaduje co nejnižší pórovitost[1].

Tepelná vodivost – je u keramiky nižší než u kovů a závisí na obsahu pórů a podmínkách přestupu tepla.

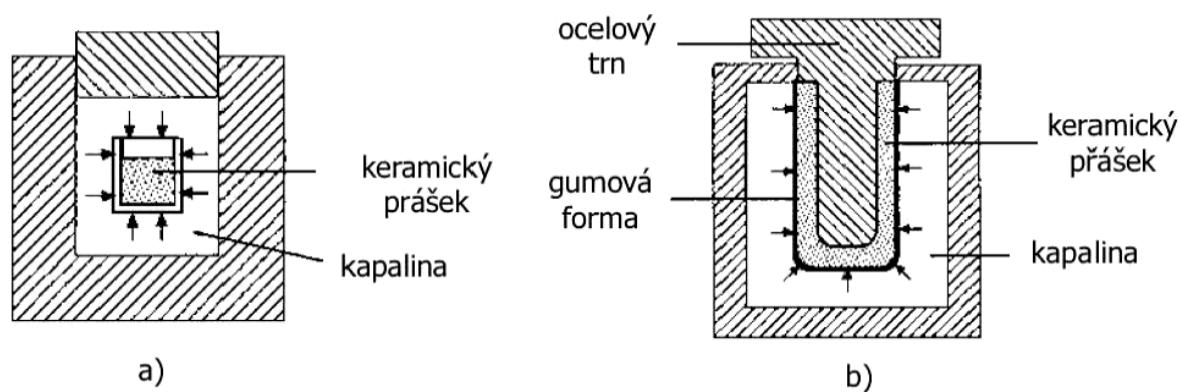
Tepelná roztažnost – charakterizuje změnu rozměru materiálů vlivem změny teploty. Při změně teploty se objem zvětšuje.

Odolnost vůči oxidaci – je u keramických materiálů velmi vysoká díky vzniku ochranné oxidické vrstvy, ale přítomnost sklovité fáze na hranicích zrn tuto schopnost výrazně snižuje.

2.1.2. Izostaticky lisovaná keramika

Do této skupiny patří keramika používaná pro kontinuální odlévání oceli. Jedná se o výrobu keramiky z práškových oxidů různého typu, které se procesem míchání za sucha uvedou do stavu požadovaného složení. Pro dosažení požadovaných vlastností, tvarů a rozměrů se používá metoda zhutňování - formování. Vždy jde o cíl dosažení homogenity v celém objemu a co nejmenší pórovitosti materiálu. Využívá se zhutňování pomocí tlaku s cílem dát výrobku přibližný tvar a odpovídající hustotu. Rozdílná velikost částic snižuje pórovitost výrobku. Pro keramiku používanou k plynulému odlévání oceli se často jako metoda zhutňování používá metoda izostatického lisování za studena (CIP – Cold Isostatic Pressing, viz obr. 1). Převážně je využívána při výrobě těles, jež mají větší poměr výšky k průměru tělesa. To se pak dělí ještě na lisování za mokra – wet-bag, kdy díky pouzdru z pružného materiálu je dosaženo stejné hustoty v celém výlisku. Je vhodné pro objemnější výrobky. Při lisování za mokra – dry-bag se pružná forma plní až v lisovací komoře, ta se po uzavření zaplaví. Tlak je dán pístem, který působí na plastickou formu a tak se zvyšuje tlak v kapalině obklopující formu. Metoda je vhodnější pro menší výlisky.

Metoda izostatického lisování za studena je vhodná pro tvarově složitější výrobky větších i menších rozměrů. Při lisování se používá tlak až 600MPa, který vyvíjí kapalina na prášek, obvykle vibračně zhutněný, který je uzavřen v pružném obalu. Výsledkem je keramika s vysokou hustotou a izotropními vlastnostmi. Samotný proces lisování mívá obvykle tři fáze, první je rychlý nástup tlaku, druhá je výdrž na dané hodnotě, třetí postupné snižování tlaku. Třetí fáze má největší význam pro celkové vlastnosti materiálů a má největší význam pro zabránění vzniku trhlin.

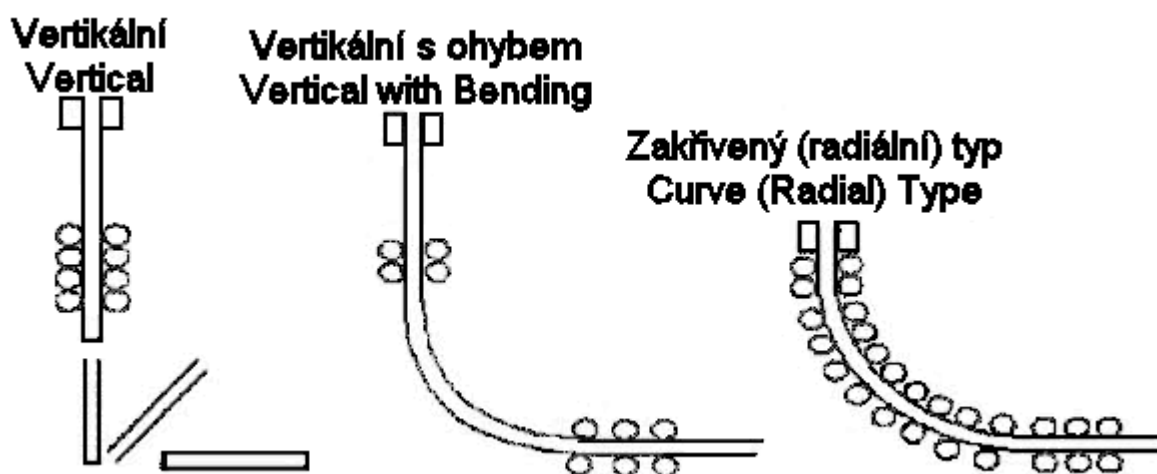


Obr. 1 Izostatické lisování za studena: a) za mokra, b) za sucha [4]

2.2. Základní charakteristika použití izostaticky lisované keramiky

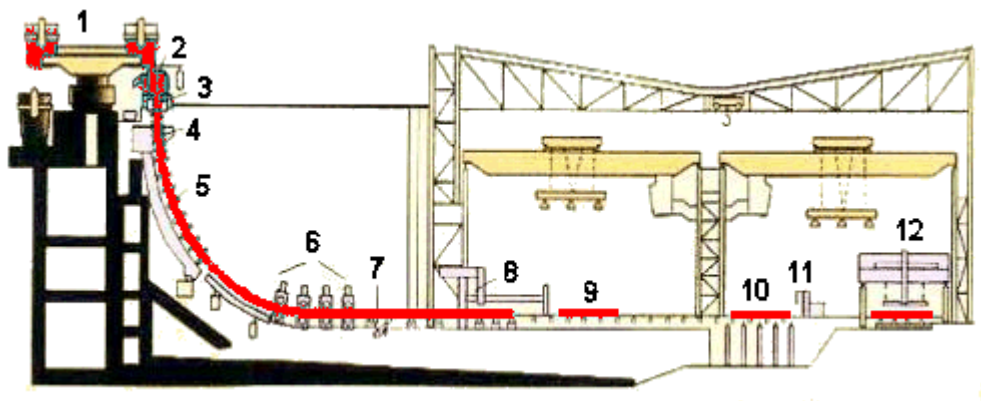
2.2.1. Plynulé odlévání oceli

Plynulé odlévání je proces, při němž odlévaná ocel tuhne do seminekonečného bloku, sochoru nebo bramy pro válcování konečných tvarů. Plynulé odlévání se začalo zavadět od 2.pol. 20st., do té doby se ocel odlévala do stacionárních forem do tvarů ingotů. Plynulé odlévání sebou přineslo zvýšení produktivity, kvality a celkové efektivnosti a stalo se tak hlavní technologií výroby oceli. Díky inovacím a neustálým vývojem se plynulé odlévání oceli stalo sofistikovaným procesem, kterým se dnes vyrábí přes 90% veškeré oceli na světě [5]. Stroje pro plynulé odlévání lze rozdělit do několika typů, přičemž nejpoužívanější je zakřivený radiální typ (viz obr. 2).



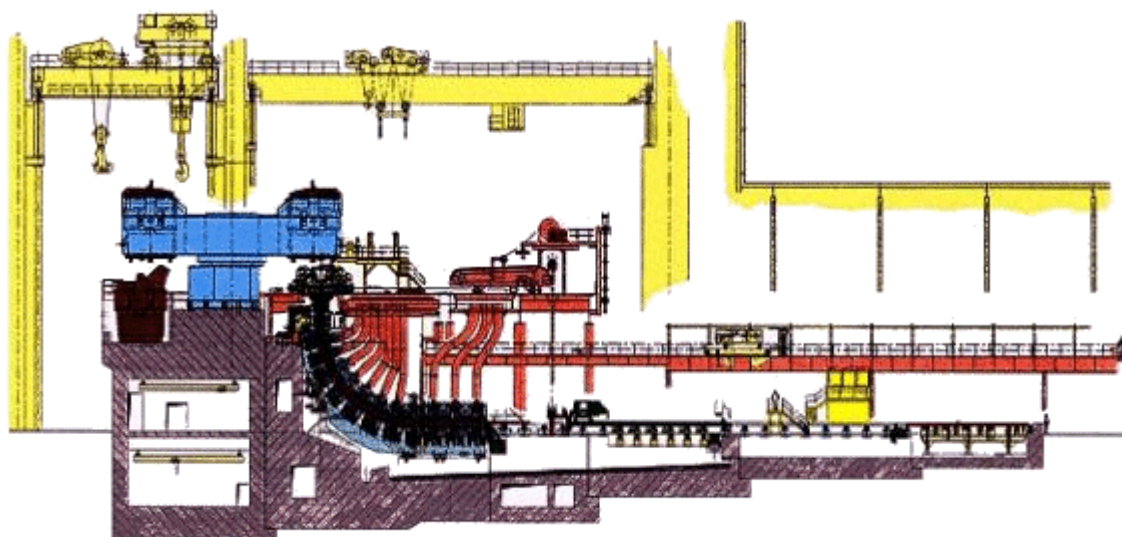
Obr. 2 Typy strojů pro plynulé lití [5]

Ocel jde z konvertorů nebo elektrických pecí do pánví a poté do stroje na plynulé odlévání. Bývá běžné, že než se ocel předá do zařízení pro plynulé odlévání, pánev se odstaví na pracoviště pánvové metalurgie pro provedení mimopecního zpracování. Typické uspořádání zařízení pro lití sochorů – předlitky čtvercového profilu (viz obr. 3). Pánev je z otočného držáku dopravována do mezipánve, z ní do krystalizátoru (měděná forma chlazená vodou), zde začíná tuhnutí které kontinuálně pokračuje v sekundární zóně a prochází tažnými válci. Dle různých konfigurací může následovat rovnací prvek, následované dělicím zařízením a dále dopravním zařízením [6]. Schéma pro odlévání bram – výrazný obdélníkový profil, který se vyznačuje delší drahou tažných válců a intenzivnějším sekundárním chlazením, protože objem oceli je mnohem větší (viz obr. 4). Příklady odlévaných profilů, tvary jsou ovlivňovány výslednými polotovary (viz obr. 5).

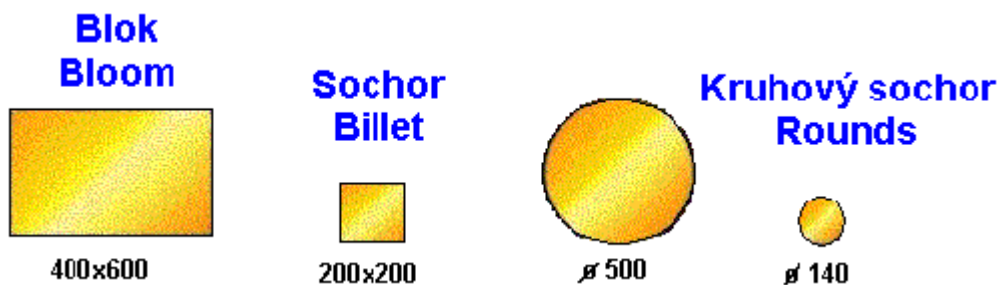


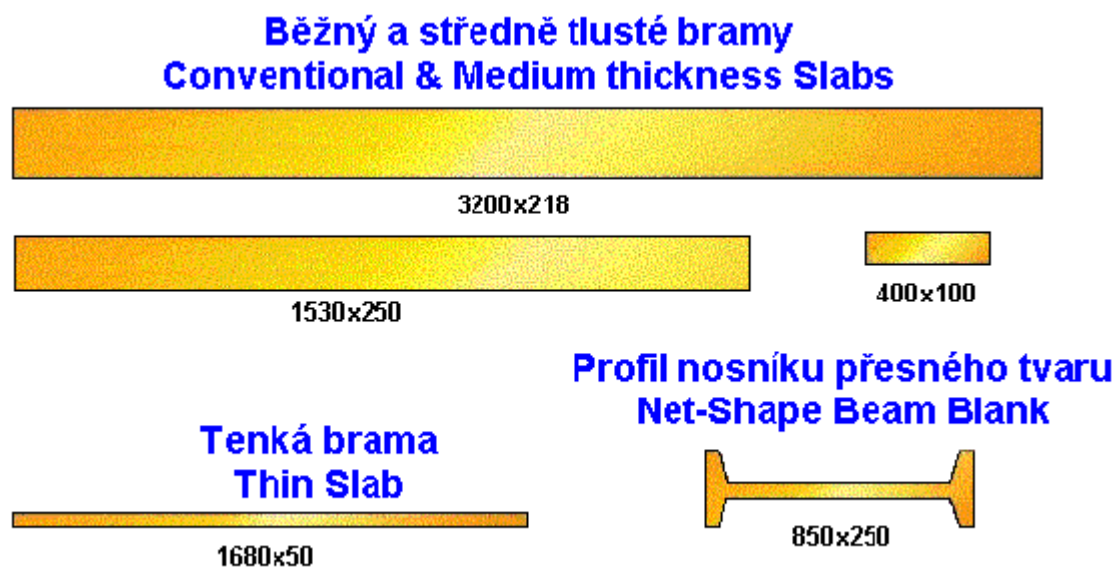
Obr. 3 Schéma provozu na plynulé odlévání sochorů [7]

1-pánvová revolverová hlavice, 2-mezipánev, 3-krystalizátor, 4-sekundární chlazení, 5-tažné zařízení+sekundární chlazení, 6-rovnací zařízení, 8-dělicí zařízení, 9-12-dopravní a skladovací zařízení



Obr. 4 Schéma zařízení na plynulé odlévání bram





Obr. 5 Příkladů odlévaných profilů

2.2.1.1. Součástí plynulého odlévání

Proces plynulého odlévání se dělí na jednotlivé sekce, kde patří mezipánev, která je umístěna nad krystalizátorem, kdy rychlost proudění taveniny z mezipánve je regulována. Krystalizátor, který patří mezi primární chladicí zónu, vodou chlazená měděná forma. Sekundární chladicí zóna, která je umístěna pod krystalizátorem a předlitek je zde chlazen vodními nebo vodovzdušnými tryskami. Terciární chladicí zóna, kde je předlitek již ztuhlý a chladne. Dělicí zařízení, které dál rozděluje na jednotlivé kusy.

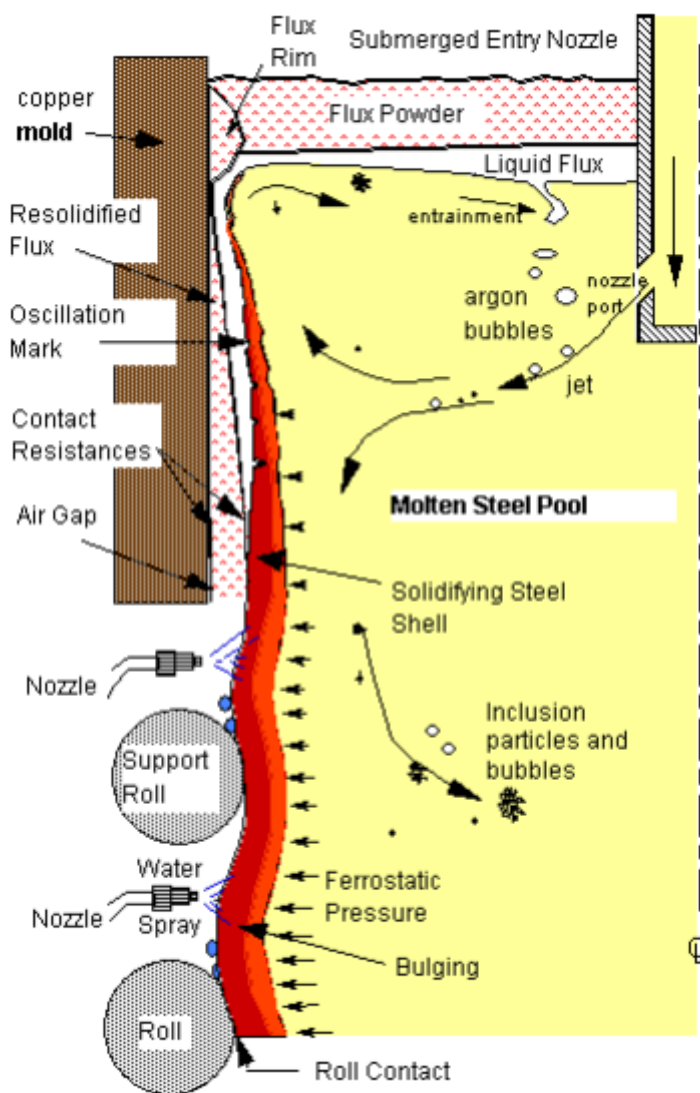
Mezipánev

Mezipánev je považována již za aktivní metalurgickou nádobu, ve které lze různými způsoby ovlivňovat výslednou kvalitu oceli, především však její mikročistotu. Mezi základní způsoby patří použití vhodné konfigurace hradítek a přepážek pro cílené ovlivňování proudění, použití filtrace, použití dmýchání inertního plynu dnem mezipánve, použití víceotvorových přepážek a další. Mezipánev sehrává důležitou úlohu i při sekvenčním odlévání ocelí dvou rozdílných značek s různým chemickým složením. Bývá ve tvaru obdélníku, delta nebo tvaru „T“. V dolní části jsou umístěny trysky, které dopravují tekutou ocel do krystalizátoru. Její velikost je asi 1/10 velikosti lící pánve. Mezi její hlavní funkce patří: pomoc při separaci oxidů, zabránění vniknutí strusky do krystalizátoru, zajištění nepřetržitého toku oceli během výměny pánve, udržení stacionární výšky k zajištění konstantního toku a konstantní rychlosti lití

a rozdělení ocelí do jednotlivých licích proudů. Proudění tekuté oceli zajišťuje keramická ponorná trubice, která zrovnoměňuje proud a chrání ocel před oxidací.

Krystalizátor

Je otevřená forma vyrobena z velmi čisté měděné slitiny. Hlavní funkcí je zajištění ztuhnutí povrchové skořepiny do takové pevnosti a tloušťky, aby udržela obsah tekutého jádra při vstupu proudu do zóny sekundárního chlazení. Rozhodující je složení, tvar a tloušťka skořepiny bez vnitřních a povrchových vad a s co nejmenší pórovitostí. Přenos tepla probíhá jednotlivými vrstvami, vytvářející celkový odpor proti přenosu tepla (viz obr. 6)



Obr. 6 Schéma průřezu činnosti krystalizátoru

Přenos tepla mezi krystalizátorem a předlitkem je klíčový a složitý problém s obtížně definovatelnými okrajovými podmínkami. Chlazení v krystalizátoru je kombinací přenosu tepla ve-

dením, sálaním a konvekci. Stěny krystalizátoru jsou chlazené vodou pomocí vodních kanálů a odvádějí teplo z tuhnoucí oceli. Vnitřní povrch měděných desek obsahuje nikl nebo chróm, ke zvýšení tvrdosti a zabránění otěru mědi do proudu oceli. Hladina oceli je v krystalizátoru pokryta souvislou vrstvou licího prášku, který se taví a spéká a má chránit hladinu před oxidací a mazat plochy na povrchu na licí kůry a pracovní stěnu krystalizátoru. Důležitou funkcí je také oscilace krystalizátoru, která minimalizuje tření mezi pracovním povrchem krystalizátoru a skořepinou, a brání přetržení skořepiny a výtoku oceli. Oscilace v řádech jednotek Hz se vybuďuje hydraulicky nebo motoricky. Jde o snahu vzniku tlakového napětí a snížení tahového napětí vedoucí k povrchu bez trhlin a pórů.

Sekundární chlazení

V této oblasti má předlitek ještě tekuté jádro a je ostřikován vodou. Vedení je zajištěné opěrnými a vodíciemi válečky. V této oblasti má rovnoměrnost a intenzita chlazení velký vliv na povrchovou kvalitu, hlavně na vznik povrchových a vnitřních trhlin. Chlazení je prováděnou vodou nebo kombinací vody a vzduchu. Součástí sekundárního chlazení je i oblast segmentů válců, které zajišťují posuv tuhnoucí proudu. Protože má předlitek po výstupu z krystalizátoru ještě relativně slabou kůru a ta musí současně vydržet tahovou sílu i ferrostatický tlak oceli. Vzdálenosti a průměry válců jsou důležité k minimalizování vyboulení proudu mezi válci a zajišťují udržení tvaru a brání vzniku průvalů.

Ostatní prvky

Jako je důležité udržet tvar, tak stejně důležitý je převod z vertikální do horizontální polohy. Při rovnání působí na vnějším oblouku skořepiny tahové napětí a na vnitřním tlakové. Při příliš velkém napětí na vnější části, mohou vznikat povrchové trhliny a jiné vady mající vliv na kvalitu. Napětí lze zmírnit použitím co největšího rovnacího oblouku. Rovný předlitek je dále dopravován k dělicímu stroji, kde se řeže na požadovanou délku. Řezání probíhá mechanicky nebo kyslíkovým hořákem a poté dle tvaru nebo následného použití skladovány nebo dál dopravovány ke konečnému zpracování.

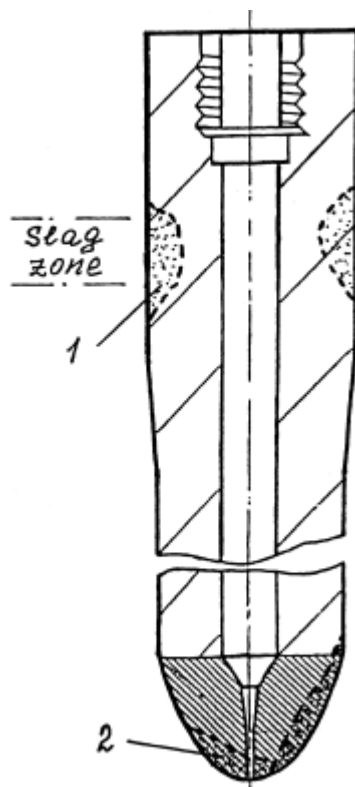
2.2.2. Použití izostaticky lisované keramiky

Tato speciálně vyráběná technická keramika má nezastupitelné místo v procesu plynulého odlévání jako jeho nedílná součást s důležitými vlivy na celkovou kvalitu a efektivitu.

Používá se v oblasti mezipánve, která se považuje již za aktivní metalurgickou nádobu, kde lze různými způsoby ovlivňovat výslednou kvalitu oceli, především její mikročistotu, a to vhodnou konfigurací přepážek a hradítek k ovlivnění proudění, použití dmýchání plynu, použití filtrace a podobně. V této oblasti se z izostaticky lisované keramiky používají mezipánvové výlevky a zátkové tyče. V oblasti krystalizátoru, který je považován za poslední metalurgické místo, kde lze ještě ovlivnit mikročistotu oceli, se ze speciální žáruvzdorné keramiky uplatňuje ponorná výlevka.

2.2.2.1. Zátková tyč

Zátková tyč slouží k regulaci výtoku oceli z mezipánve do krystalizátoru a zároveň slouží k přívodu argonu do výtokového uzlu. K regulaci výtoku oceli dochází změnou polohy hlavy zátkové tyče oproti sedlu ponorné výlevky, přes které proudí ocel. Dle způsobů užití se mění materiál, z kterého je zátková tyč vyrobena. Grafitošamotové se používají pro méně náročné odlévání, grafitokorundové mají použití pro náročnější odlévání vysocелеgovaných a speciálních ocelí s prodlouženou dobou odlévání, sicalové pro odlévání speciálních ocelí a kontilití. Zátkové tyče jsou vybaveny různými typy uchycení dle způsobů použití. Důležitým krokem před instalací zátkové tyče je zvolený způsob přehřevu, který slouží především k zamezení teplotního šoku a zamezení namrzání oceli na hlavě zátkové tyče. Při tepelném šoku může dojít k prasknutí keramiky. Při namrzání oceli dochází k absorbování tepla oceli studenou keramikou po obvodu hlavy zátkové tyče, vedoucí ke zhoršení kontroly výtoku oceli z mezipánve do krystalizátoru. Nejvíce nebezpečná při ohřevu zátkové tyče je první fáze, kdy teplota dosahuje 600°C a dochází k tvorbě páry.



Obr. 7 Schéma poškození zátkové tyče [8]

- 1- Struska lemující erozi v závislosti na chemickém složení
- 2- Eroze zátkové hlavy vyvolána proudem oceli kolem hlavy, chemická reakce mezi zátkovou tyčí a některými částicemi v oceli (např. vápník) [8]

Protože nelze dosáhnout ideálního cyklu přehřevu pro keramiku na bázi Al_2O_3 , je keramika chráněna vrstvou speciální glazury, která chrání keramiku i v těchto podmínkách před oxidací. Během samotného odlévání může docházet k poškození zátkové tyče. Typické schéma poškození zátkové tyče během odlévání (viz Obr. 7).

2.2.2.2. Mezipánvová výlevka

Mezipánvová výlevka tvoří jak dosedací plochu pro hlavu zátkové tyče, tak současně dosedací plochu pro ponornou výlevku. Hlavní význam je ochrana vytékající oceli z mezipánve do krystalizátoru před oxidací. K dokonalému utěsnění se používá žáruvzdorný tmel a k vyrovnání okraje žáruvzdorný beton. Z důvodu nepřítomnosti žádného kloubu, tedy přímého spojení, je vyloučeno nasátí vzduchu, vedoucí ke snížení re-oxidace a tím zabránění vzniku vměstků. Vyrábí se na bázi oxidu hořčíku, oxidu hliníku nebo oxidu zirkonia. Bývá považována za nekritičtější oblast, protože ji nelze během lití oceli nahradit.

2.2.2.3. Ponorná výlevka

Ponorná výlevka (submerged entry nozzle – SEN) zajišťuje dopravu oceli z mezipánve do krystalizátoru. Slouží také k ochraně licího proudu, kdy vlivem podtlaku při odlévání oceli dochází k nasávání okolní atmosféry a reoxidaci oceli. Kromě těchto základních funkcí, plní výlevky další úkoly a to zamezení rozstříku kovu, odlévání předlitků bez vnitřních a povrchových vad, zajištění optimálního proudění s cílem dosažení: klidné hladiny oceli s licím práškem na úrovni menisku, zabránění strhávání licího prášku z hladiny do krystalizátoru, usnadnění vyplouvání a pohlcování nekovových vměstků do licího prášku, rovnoměrné rozdělení kovů po průřezu krystalizátoru pro vznik rovnoměrné licí kůry. Ponorné výlevky lze rozdělit do dvou typů, a to náporové a beznáporové výlevky. Rozdíl mezi oběma typy je ve způsobu přivádění oceli do krystalizátoru a tím i ovlivnění proudění ve vznikajícím předlitku [10,11,12].

Výběr vhodného typu výlevky pro dané plynulé odlévání je ovlivněn více faktory: tvar a rozměry krystalizátoru, licí rychlost, charakter proudění, jakost odlévané oceli apod. Zvolením vhodného typu lze zásadně ovlivnit výslednou kvalitu a mikročistotu oceli.

2.3. Výroba izostaticky lisované keramiky

Proces výroby speciální keramiky je poměrně složitá a nákladná záležitost z důvodů drahých vstupních materiálů a náročnosti technologických zařízení nutné k výrobě a rozmanitosti výrobků (různé tvary, rozdílné chemické složení) dle rozdílných požadavků jednotlivých zařízení k plynulému odlévání oceli.

2.3.1. Materiál

Vstupní suroviny, které jsou základem pro výrobu speciální keramiky, podléhají přísným podmínkám kontroly, skladování a samotného zpracování. Suroviny určené k dalšímu zpracování jsou ve formě prášku, různého složení (přesná specifikace je chráněna výrobcem) na bázi oxidů Al_2O_3 , ZrO_2 , MgO a SiO_2 jako hlavní složky. Vstupní materiál se dále dle jednotlivých typů a v závislosti na požadovaném složení míchá bez použití vody nebo pojiv do výsledné podoby směsi s přesně daným složením. Na každém z konkrétních budoucích výrobků je použito několik druhů směsí rozdílných složení dle daných požadavků na výrobek.

2.3.2. Testování

Každá jednotlivá směs s přesně daným označením a specifikovaným složením podléhá testování k zajištění maximální kvality. V přesně daných frekvencích se kontroluje teplota směsi, a to jak směs namíchaná, tak směs uskladněná pro další použití, samozřejmostí je kontrola a nastavení teploty v přesně daných rozmezích jak v laboratořích, tak na jednotlivých pracovištích, kde suchá směs přichází do kontaktu s okolím. Dalšími testovacími metodami, kterými směs prochází je test vlhkosti a měření hustoty. U vybraných směsí se provádí také test pevnosti. Směs je zkušebně vylisována v laboratoři a poté podrobena měření ve speciálním zařízení. Čím větší pevnost směsi, tím menší náchylnost k prasklinám po vylisování. Dodržení všech daných postupů je základem k zhotovení kvalitního výrobku.

2.3.3. Lisování

V této části procesu lze významně ovlivnit výsledné vlastnosti a kvalitu výrobku. Lisování probíhá metodou studeného izostatického lisování, kdy pomocí lisovacích trnů a pružné formy, lze dát výrobku konečnou podobu, zahrnující různé tvary, délky a průměry dle požadavků. Důležitou součástí je samotná příprava před lisováním, při plnění forem, které je manuální a je kladen důraz na přesném postupu plnění. Z toho vyplývající rizika při manuálních operacích jsou záměna směsí, nedostatečná vibrace, směs není v požadované poloze výrobku dle technické specifikace apod. Neméně důležitým faktorem ovlivňující konečné vlastnosti je nastavení lisu. Probíhá obvykle ve 3 krocích – nástup tlaku, výdrž, postupné snižování tlaku) a nastavením časových sekvencí jednotlivých kroků, lze měnit konečné vlastnosti keramiky.

2.3.4. Slinování

Dalším fází výroby je slinování v pecích, kdy po vylisování už v keramice v pevném stavu dochází k difúznímu transportu hmoty. Provádí se ve dvou krocích, kdy v první kroku jde o tzv. vytvrzení, kdy teplota nepřesahuje 250°C, v druhé fázi už probíhá slinování na teplotě pod bodem tání keramiky. Nastavení teplotních křivek pecí má vliv na požadovanou kvalitu. U některých výrobků, které se před použitím v odlévání nepředehřívají, je nutná kontrola jejich vnitřní oxidační vrstvy po slinování. Tato oxidační vrstva je jejich jedinou ochranou proti tepelnému šoku. Po procesu slinování procházejí výrobky škálou testovacích metod, kdy se z každého jednotlivého výpalu nařezou testovací vzorky a pomocí destruktivních metod se měří jeho vlastnosti. *MOR* – modul pevnosti, který se měří na testovacím vzorku, na kterém dojde k několikanásobnému zlomení a výsledná hodnota je stanovena jejich průměrem. *POR*

– měření porosity, které se provádí v kapalně chemické látce – solventu, látce o nízké hustotě. Nejdříve se měří hustota solventu pomocí speciální nádoby. Určení hustoty a měrné specifické hmotnosti také probíhá pomocí solventu. Dalším testovací metodou je měření úbytku vypálením v pecích.

2.3.5. Finální fáze

Jsou to operace, které probíhají před dokončením výroby keramiky a liší se dle jednotlivých typů výrobků. U ponorných výlevek, kde není zaručena rozměrová přesnost, procházejí tyto výrobky ještě fází obrábění na přesně stanovené rozměry dle technické specifikace. Kvůli odolnosti proti oxidaci při používání keramiky je na její povrch i vnitřek aplikovaná speciální vrstva glazur, různých druhů dle požadavků. Keramika je náchylná k nasávání okolní vlhkosti, proto je důležité při balení a i skladování udržovat keramiku v suchu.

2.3.6. Shrnutí

Výroba speciální keramiky, stejně jako výroba v ostatních odvětvích, podléhá neustálému rozvoji, vývoji nových technologií a procesu zlepšování. U speciální keramiky je důležité dodržet všechny kritéria a požadavky během výroby s cílem na výslednou kvalitu, která je nezbytně nutná pro funkční a bezproblémové použití při odlévání oceli, protože v každé fázi výroby, lze významně ovlivnit vlastnosti a kvalitu této keramiky.

2.4. Vlivy tvaru na mechanismy proudění u ponorných výlevek

Ponorné výlevky dělíme do dvou základních skupin: ponorné výlevky náporové a beznáporové. V současné době jsou neustále zvyšovány požadavky na kvalitu oceli při maximální míře efektivnosti, a to má také vliv na vývoj a zdokonalování ponorných výlevek. Dochází tak ve vývoji k optimalizaci tvaru ponorné výlevky k docílení zvýšené jakosti odlévání předlitků. Vývoj nových tvarů konstrukce ponorných výlevek je realizován pomocí fyzikálního a numerického modelování, s následnými provozními experimenty, vedoucí k potvrzení výsledků získaných modelováním.

2.4.1. Modelování proudění

V současné době, kdy vývoj počítačových technologií jde neustále kupředu, staly se matematické modely důležitým nástrojem k získání dalšího kvantitativního pohledu. Aplikace určené k modelování stavů, zahrnující různé druhy výpočtů, které dokážou rozpoznat a identi-

fikovat mechanismy různých typů defektů a problémů způsobené původními poruchami a dokážou optimalizovat a zvýšit produktivitu nebo minimalizovat defekty.

Trojrozměrné modelování slouží k simulaci proudění při plynulém odlévání za použití výlevek pro jedno nebo vícefázové podmínky. Proudění uvnitř formy krystalizátoru, které je tak důležité pro kvalitu, je řízené prouděním skrz výlevku. Tvar a konstrukce výlevky je důležitá jak pro výslednou kvalitu, tak pro snadnou výměnu během odlévání [15].

Modelování vícefázového proudění výlevkami

Důležité je také proudění uvnitř výlevky. Modelování, které zahrnuje kvantitativní popis, bylo definováno na základě studií závislosti a konvergence. V Eulerianovém vícefázovém modelu se používá program CFX ke studiu trojrozměrného turbulentního toku tekuté oceli s bublinkami argonu v oblasti mezipánve s použitím zátkových tyčí. K popisu, který řeší daný model, slouží vztah pro kapalnou fázi:

$$\frac{\partial y(v_{li} f_l)}{\partial x_i} = 0 \quad (2)$$

$$\rho_l \frac{\partial (v_{lj} v_{li} f_l)}{\partial x_j} = -f_l \frac{\partial p_l}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[f_l (u_l + u_t) \left(\frac{\partial v_{li}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{lj}}{\partial x_i} \right) \right] + c_{lg} (v_{gi} - v_{li}) \quad (3)$$

a pro plynnou fázi:

$$\frac{\partial (v_{gi} f_g)}{\partial x_i} = 0 \quad (4)$$

$$\rho_g \frac{\partial (v_{gi} v_{gi} f_g)}{\partial x_j} = -f_g \frac{\partial p_g}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[f_g u_g \left(\frac{\partial v_{li}}{\partial x_j} + \frac{\partial v_{lj}}{\partial x_i} \right) \right] + f_g (\rho_l - \rho_g) g_i + c_{lg} (v_{gi} - v_{li}) \quad (5)$$

kde písmena i a j = 1,2,3 představují směry x,y a z, $v_i = \{1,2,3\}$ jsou rychlosti částic v těchto třech směrech, index l a g představují kapalnou a plynnou fázi, f je velikost frakce, ρ je hustota, u_t turbulentní viskozita a v je molekulární viskozita. Protože hustota plynu je o 3-4 řády nižší než hustota kapaliny, je turbulence v plynné fázi zanedbatelná [16].

Důležitý parametr ovlivňující výslednou kvalitu oceli je charakter proudění lázně v krystalizátoru. Výpočty pomocí matematických modelů a praktické ověřování pomocí modelů ve vodní lázni slouží k určení typu a tvaru krystalizátoru s cílem dosažení požadovaných vlastností odlévané oceli.

2.4.2. Náporová výlevka

V náporové výlevce (viz obr. 8) je proud oceli přiváděn do tuhnoucího předlitku se značnou hloubkou průniku do tekutého jádra. Z toho vyplývá, že pro ocel přiváděnou z mezipánve nejsou vytvořeny ideální podmínky pro vyplouvání nekovových vměstků do licího prášku, protože vyplouvající vměstky se mohou zachycovat mezi vznikajícími krystaly v předlitku. Náporová výlevka se proto používá pro odlévání oceli, na kterou nejsou kladeny přísné požadavky týkající se mikročistoty oceli – znečištění nekovovými vměstky.



Obr. 8 Ukázka charakteru proudění náporové výlevky v krystalizátoru 410x320 mm [12]

2.4.3. Beznáporová výlevka

Beznáporové ponorné výlevky (viz obr. 9) charakterizují boční výtokové otvory ve spodní části ponorné výlevky. Ocel přiváděna do ponorné výlevky je rozdělena výtokovými otvory na jednotlivé proudy, které proudí ke stěnám krystalizátoru, kde část přiváděné oceli směřuje k hladině krystalizátoru a druhá část směřuje dovnitř tuhnoucího předlitku. Poměrem proudu vystupující z bočních otvorů a rozdělující se na jednotlivé proudy můžeme ovlivňovat charakter proudění v krystalizátoru. Vše však záleží na celé řadě parametrů výlevky, jako je velikost, tvar, počet, sklon a vzdálenost výtokových otvorů od stěny krystalizátoru.



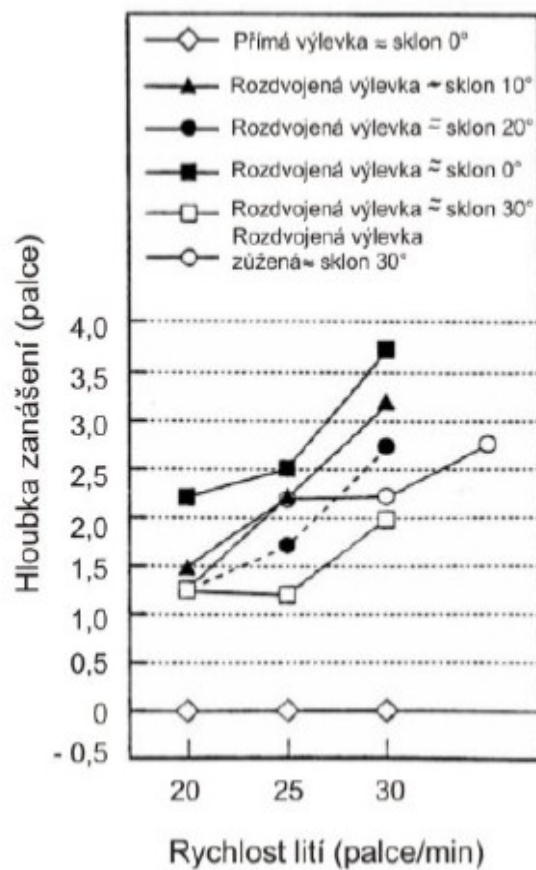
Obr. 9 Ukázka charakteru proudění ze dvou otvorové beznáporové výlevky v krystalizátoru 420x320 mm [12]

Beznáporové výlevky se proto používají pro odlévání oceli s vyššími nároky na mikročistotu. Při výběru ponorné výlevky se tedy řídíme požadavky na mikročistotu a finální kvalitu odlévaného předlitku na zařízení pro plynulé odlévání, nezanedbatelný vliv má i cena, která se vyvíjí od požadované kvality. Mezi hlavní požadavky na ponorné výlevky patří: odolnost vůči vysokým teplotám a její změně, chemická odolnost, odolnost proti zarůstání vnitřního povrchu nekovovými vměstkami, mechanická pevnost při vysokých teplotách.

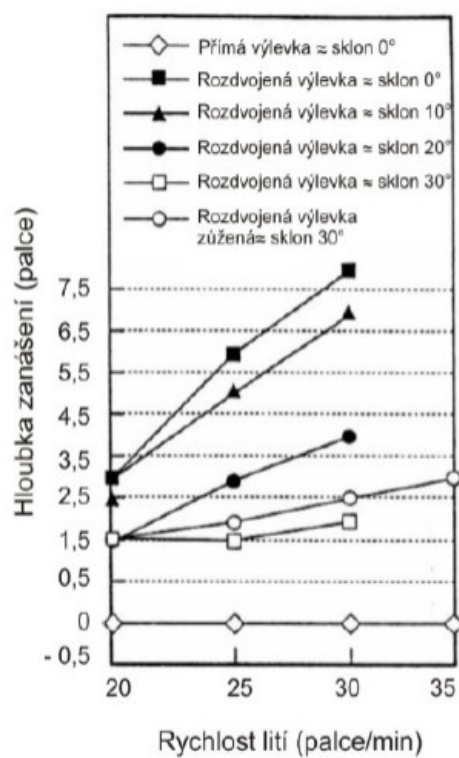
2.4.4. Studium vlivu konstrukce ponorných výlevek

Studie vlivu konstrukce bylo provedeno mnohokrát v mnoha zařízeních a na různých modelech po celém světě. Zde uvedená studie pochází z japonského podniku KOBE STEEL. Studium bylo provedeno na vodním modelu s cílem simulace hloubky ponoření, licí rychlosti a vlivu proudění ponorné výlevky na strhávání licího prášku do objemu předlitku krystalizátoru. Pro simulaci byla vybrána přímá ponorná výlevka a rozdvojená ponorná výlevka se dvěma výstupními otvory, směřující dolů pod různými úhly. Výsledky (viz Obr. 10 a Obr. 11) ukazují zanášení a separaci licích prášků turbulentním prouděním oceli, které závisí na licí rychlosti a vzdálenosti od povrchu krystalizátoru pro různé typy a úhly ponorné výlevky [13]. Dle Obr. 10 a 11 je vidět, že nejlepších výsledků bylo dosaženo při použití rozdvojené výlevky se sklonem výstupu 30° , naopak jako nejhorší se jeví výlevka se sklonem 0° . Z naměřených výsledků také plyne, že s rostoucím sklonem výstupu výlevky je dosaženo menší hloubky zanášení. Při testu výlevky se sklonem 30° , ale se zúžením, se nijak ne zlepšení parametrů oproti výlevce bez zúžení neprojevila.

Bylo provedeno matematické modelování a výzkum vlivu rychlosti a profilu proudění při použití jednootvorové a čtyřotvorové ponorné výlevky. Simulace byla provedena pomocí programu Fluent na trojrozměrném modelu blokového krystalizátoru s průřezem 350×250 mm, ve kterém jsou odlévány bloky rychlosti $0,7 \text{ m/min}$. Úhly výstupních otvorů pro čtyřotvorovou ponornou výlevku byly různé, od 25° směrem nahoru, po 15° směrem dolů, po krocích 5° . Různé úhly výstupních otvorů z čtyřotvorové ponorné výlevky byly hodnoceny pro jejich účinek na charakter směšování kovu v krystalizátoru. V modelu bylo provedeno srovnání s jednooborovou výlevkou. Čtyřotvorové výlevky pracovaly s hloubkou ponoření 175 mm pod meniskem, jednootvorová s hloubkou 85 mm.

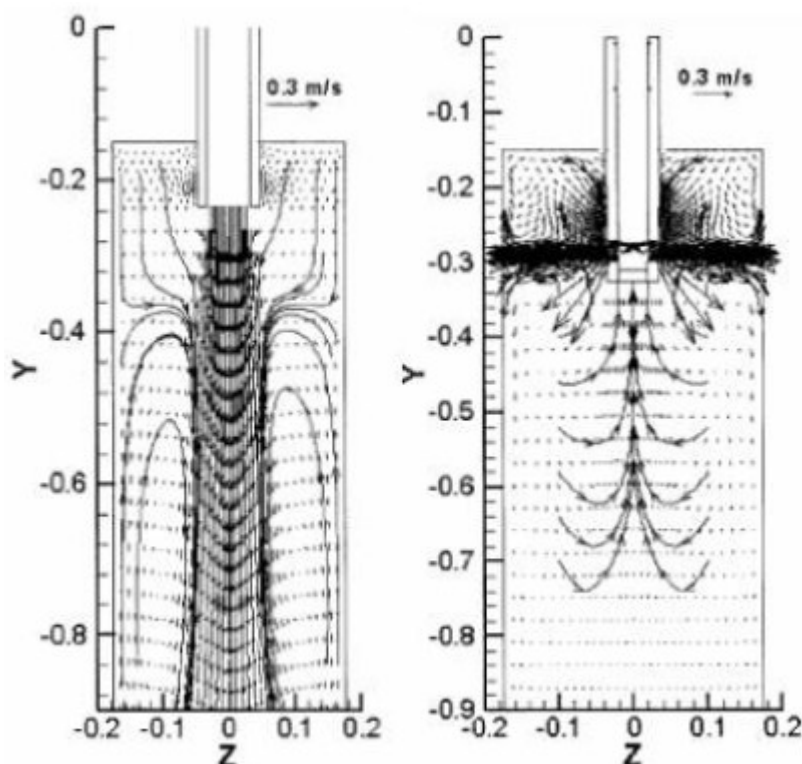


Obr. 10 Hloubka zanášení liciho prášku do krystalizátoru



Obr. 11 Hloubka separace liciho prášku v krystalizátoru

Profily rychlosti a proudová pole v krystalizátoru pro jednootvorovou a čtyřotvorovou ponornou výlevku ukazuje schéma (viz Obr. 12). Rozdělením referenčních časů a analýzou toku kapaliny lze tvrdit, že čtyřotvorová výlevka má lepší směšovací charakteristiky než přímá s jedním výtokovým otvorem. Čtyřotvorová výlevka dle charakteru toku lépe rozptyluje přehřátí a tím zvyšuje podíl rovnoosých krystalů bloků v litém stavu – primární krystalizace. Je snížena hloubka pronikání proudu a přenos tepla do menisku je zlepšší díky natavování licího prášku. Je také ale vidět, že u čtyřotvorové výlevky proud naráží na stěnu krystalizátoru a může docházet k natavování licí kůry bloku. Proti opatření je v zvýšení hloubky ponoru, aby proud narážel na silnější stěnu licí kůry [14].



Obr. 12 Rychlostní profily a proudová pole při použití jednootvorové a čtyřotvorové výlevky

Pomocí matematického modelování a následným experimentům dochází k neustálému vývoji nových tvarů ponorných výlevek dle požadované výsledné kvality. Například proti nadměrnému výskytu vměstků proběhl vývoj nových výlevek pro odlévání kruhových formátů. Výlevka s přímým výtokem a beznáporová výlevka se čtyřmi otvory a jedním excentrickým otvorem. Přímá ponorná výlevka se používá u jakostí náchylných na povrchovou kvalitu předlitků a pětioťvorová výlevka pro jakosti, kde je požadována co nejlepší mikročistota. důležitou roli hraje kromě počtu otvorů, také jejich sklon, průměr výlevky a určení ideální hloubky ponoru.

Z výše uvedených odkazů je zřejmé, že typ a konstrukční řešení výrazným způsobem ovlivňuje proudění oceli v krystalizátoru a tím i výslednou strukturu, mikročistotu a jakost.

2.5. Problematika používání keramiky pro plynulé odlévání

Při používání speciální keramiky pro odlévání oceli se klade důraz na zdokonalení procesu lití, prodlužování životnosti keramiky a zlepšení kvality oceli.

Druhy materiálů

Druhy použitých materiálů se liší v závislosti na konkrétní potřebě použití dané keramiky. Pro desky šoupátkových uzávěrů se nejčastěji používá keramika na bázi $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$. Zvýšením meze pevnosti a zahuštěním textury lze dosáhnout vyšší životnosti desek. Keramické desky na bázi ZrO_2 a MgO , které se vyznačují větší odolností proti erozi než standardní $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$ materiály, se používají k odlévání speciálních typů ocelí, především ošetřovaných CaO . Desky, které mají lepší odolnost vůči náhlým změnám teploty se vyrábějí na bázi $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{ZrO}_2 - \text{C}$. Zátkové tyče, na které jsou kladeny požadavky na vysokou trvanlivost při opakovaném použití, jsou vyráběny na bázi $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{SiO}_2 - \text{C}$ materiálů. Neustálý vývoj, který má za cíl zvýšit životnost výrobků mění chemické složení s důrazem na zvýšení mechanické pevnosti k zamezení vibračních stresů. Snížením obsahu uhlíku pro vnitřní část trubice, použitím antioxidačního nátěru na vnější část trubice a zavedení nekřemičitých materiálů, které vykazují mnohem menší opotřebení při dlouhodobém používání, se sníží abraze roztavenou ocelí.

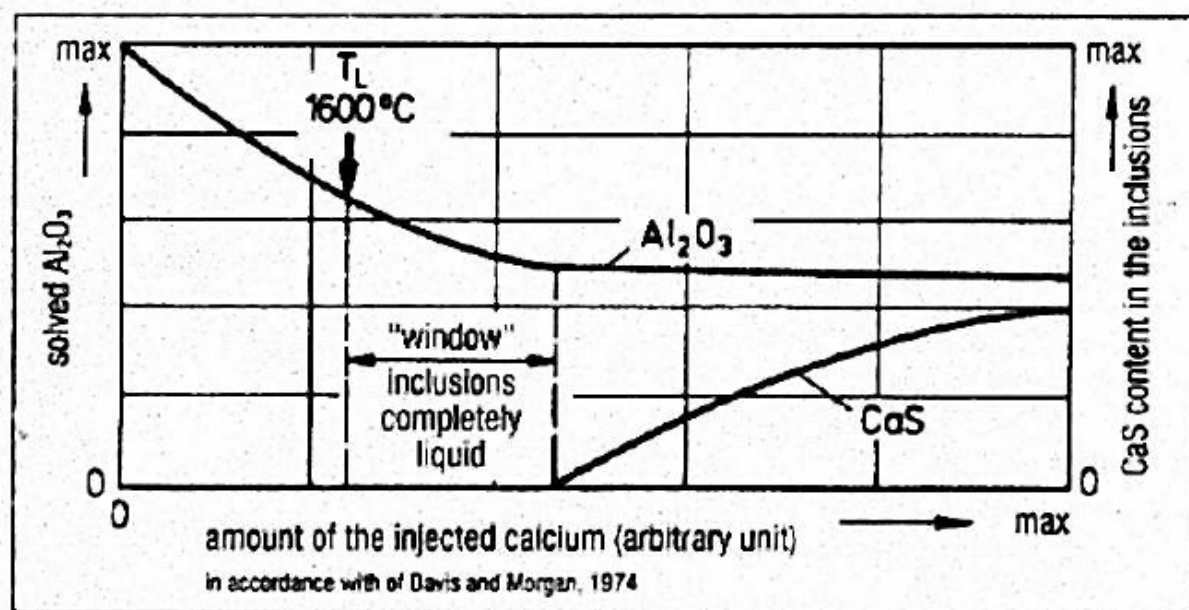
Největším problémem, který se vyskytuje hlavně u ponorných výlevek, je zarůstání licího otvoru, na vnitřním povrchu výlevky, které je způsobeno usazováním Al_2O_3 . U ponorných výlevek, které byly vyrobeny na bázi $\text{CaO} - \text{ZrO}_2 - \text{C}$ a $\text{Al}_2\text{O}_3 - \text{C}$ se kvůli snížení teplotní vodivosti, nahrazují bezuhlíkovými materiály, kdy se dnes pro vnitřní část výlevky používá jako hlavní materiál Al_2O_3 s obsahem až 80% [17].

Zarůstání výlevek

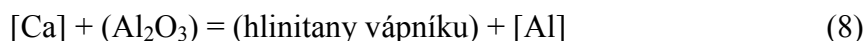
Hlavní příčinou zarůstání výlevek je usazování nekovových vměstků na stěnách výlevek. Například u oceli s vyšším obsahem síry dochází k usazování vměstků Al_2O_3 a CaS na stěnách výlevky a jejich postupný růst. K zabránění zarůstání, je potřeba zabránit vzniku těchto vměstků. Vměstky lze modifikovat na jiný méně škodlivý druh a nebo vytvořit takové podmínky, aby vznikaly až při tuhnutí a krystalizaci oceli. Modifikace je změna chemického složení vměstku, velikosti a tvaru.

Jako modifikátor se nejčastěji používá vápník, ve formě CaSi. Vápník je v oceli téměř nerozpustný a nemá vedlejší účinky na kovovou matici. Přidáním vápníku zajistíme dobrou slévateľnost pomocí kontroly tvaru a stavu vměstku. Interval koncentrací vápníku, který převede tuhý Al_2O_3 na tekutý je relativně úzký. Je potřeba se vyhnout nadměrné koncentraci vápníku, který může se zbývající sírou tvořit také nežádoucí CaS, který také způsobuje zarůstání výlevek. Vhodné rozmezí obsahu vápníku je zobrazené na (Obr. 13). Před výpočtem požadovaného množství vápníku, který má být do tavby přidán je důležité znát tyto informace: obsah Al_2O_3 v oceli před modifikací, obsah síry a volného kyslíku, obsah volného vápníku požadovaného pro přidání a ztráty způsobené vypařováním. Dle názoru Stolteho [18] se při dobré dezoxidaci taveniny a velmi nízké deoxidaci rozpustí v tavenině okolo 15% přidaného vápníku.

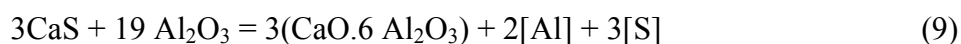
Pokud je vápník přidáván do oceli, může vytvářet CaS nebo modifikovat Al_2O_3 vměstky a to v závislosti na obsahu hliníku, kyslíku a síry. Z termodynamického hlediska bude vápník reagovat s kyslíkem nebo sírou do té doby, dokud se jejich koncentrace nebude pohybovat na nízké úrovni (pod 2ppm) [18].



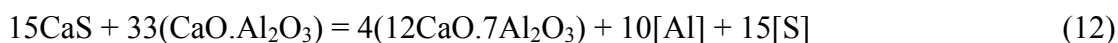
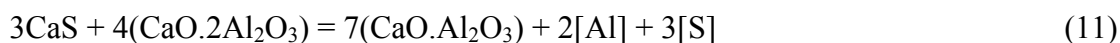
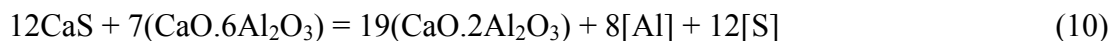
Obr. 13 Změna složení vměstku přidáním vápníku



Mezi kritické otázky patří, zda bude či nebude vápník, přidávaný do oceli, reagovat se sírou a vytvářet tuhý CaS (7) nebo modifikovat Al_2O_3 na tekutý hlinitan vápenatý v důsledku reakce (8). Ke stanovení, zda bude vápník modifikovat vměstky nebo bude reagovat se sírou byly kombinace reakcí (6) a (7) podrobeny termodynamické analýze. Například, pokud je vápník přidáván do oceli v zájmu transformace Al_2O_3 na $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$, dochází k reakci:



Jestliže obsahy Al a S překročí hodnoty potřebné pro rovnováhu v reakci (9), dojde k vytvoření CaS. V případě dalších hlinitanů vápníku bude docházet k reakcím:



Proto, aby docházelo k tvorbě tekutých vměstků, musí být obsahy hliníku a síry menší, než hodnoty potřebné pro rovnováhu v reakci (12) [19].

3. ZÁVĚR

Na základě literárních odkazů prezentovaných v této práci má speciální izostatická keramika nezanedbatelný vliv v procesu plynulého odlévání oceli. Je patrné, že vlivem změny tvaru, konstrukce, případně chemického složení, lze docílit lepších výsledků týkající se kvality a mikročistoty oceli zejména použití v oblasti krystalizátoru, tak i v oblastech mezipánve.

Studiem matematických modelů nebo modelů ve vodních lázních představující formu krystalizátoru, lze na základě změny tvaru nebo výšky ponoru, pomocí simulací a výpočtů měnit výrazně směry a rychlosti proudění za účelem zvýšení kvality oceli a mikročistoty. Získané závěry simulací a výpočtů mohou být poté odzkoušeny v reálném procesu k ověření získaných dat.

Je zřejmé, že modelování pomocí speciálních počítačových aplikací, vede k vývoji nových konstrukcí a tvarů speciální keramiky k zajištění co nejlepší kvality a efektivity samotné výroby oceli.

4. LITERATURA

- [1] JONŠTA, Z. Vlastnosti technické keramiky a jejich hodnocení. Kovosil Ostrava, 1998
- [2] MAZANEC, K. Technické materiály II, Sylaby přednášek, ES VŠB-TU Ostrava, 1993.
- [3] HIDVÉGY, J., DUSZA, J.. Nové konstrukční materiály, TU Košice, 1998.
- [4] Rahaman, Mohamed N. *Ceramic Processing and Sintering*, 2nd edition, New York: Routledge, USA, 2003, ISBN 978-0-203
- [5] W.R.Irving, Continuous Casting of Steel, (London, UK: Inst. of Materials, 1 Carlton, House Terrace, 1993), 1-206.
- [6] H.F.Schrewe, Continuous Casting of Steel, Fundamental Principles and Practice, (StahlundEisen, Dusseldorf, Germany, 1991), 194
- [7] Etienne, A., Ots J.-M., Automatic Control of Secondary Cooling in a Slab Caster, *Solidification Technology in the Foundry and Cast House Conf. Proc.* (Coventry, England: The Metals Society, Sept. 15–17, 1980), 532–535.
- [8] BRODSKY S., SMIRNOV A., NESVET V., PIKUS M. Optimization of refractory choice while steel steaming on CCM.–J. Metal and casting Ukraine. 1999. No.3-4. – P. 40-42.
- [9] Böhm, Z. aj. Plynulé odlévání oceli. 1. vyd. Praha, SNTL, 1992. 443 s
- [10] Schwerdtfeger, K. Metallurgie des Stranggießens. Verlag Stahl und Eisen mbH. Düsseldorf, 1992, 640 s.
- [11] Irving, W. R. Continuous Casting of Steel. The University Press, Cambridge, 1993, ISBN 0-901716-53-7
- [12] Xiu, W.T., Carlsson, G.: Water Model Studies of Fluid Flow in CC-Moulds when Submerged Entry Nozzles are Used, *Scandinavian Journal of Metallurgy*, 1983, Vol. 12, no. 3, pp. 121-128.
- [13] Ray, A.K., Singh, R.K., Amitava, P., Mazumdar, S. Evaluation of SEN Design for Bloom Casting Based on Mat. Modelling. *AISTech 2005*, 2005, Vol. II, pp. 863-871
- [14] Schlichting, W.K., Gale, J.P., Bullock, R., Loushin, K., Takimoto, T. Commissioning of USS/Kobe's No. 2 Bloom Caster Facility, *Iron & Steelmaker*, 1996, Vol. 23, no. 6, pp. 35-39.
- [15] B.G. Thomas, Final Report NSF Grant DMI-98-00274, Jan. 31, 2002.
- [16] B.G. Thomas, "Mathematical Models of Continuous Casting of Steel Slabs" (Annual Report, Continuous Casting Consortium, University of Illinois at Urbana-Champaign, 1999).

- [17] Yoshitomi J., Asano K.: New technologies for functional refractories. Sborník z mezinárodní konference o výrobě žárovzdorných materiálů. Praha 2003
- [18] Stolte, G.: Secondary Metallurgy, Fundamentals Processes Applications, 2002. (ISBN 3-514-00648-2)
- [19] Fruehan, R. J. - Larsen, K.: Calcium Modification of Oxide Inclusions, Iron&Steelmaker, July 1990, p 45 – 52.